

## マイクロ・モータの磁気回路の理論的解析について

その他（別言語等） のタイトル	On the Theoretical Analysis of the Magnetic Circuit in Micro-motor
著者	関所 忠則，伊達 隆三，近藤 修
雑誌名	室蘭工業大学研究報告
巻	5
号	1
ページ	105-118
発行年	1965-07-08
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/3232">http://hdl.handle.net/10258/3232</a>

# マイクロ・モータの磁気回路の理論的解析について

図所 忠 則 ・ 伊 達 隆 三 ・ 近 藤 修

## On the Theoretical Analysis of the Magnetic Circuit in Micro-motor

Tadanori Zusho, Ryūzō Date and Osamu Kondō

### Abstract

A "micro-motor" as the word goes, is an extremely small D. C. motor with the permanent magnetic field, so the powerful torque and practically constant speed are required over any load range.

The present writers analyzed the torque and compared it with their experimental results.

Then, it is concluded that the torque depends on the flux distributing over the air gap, which is analyzed by the magnetic circuit and the equivalent permeance.

At the end of this paper are tabulated the relations among the angles made by the stator and the rotor, the corresponding torques and those distributions.

### 1. 緒 言

マイクロ・モータは永久磁石界磁方式の超小型直流電動機で、テープレコーダ、プレーヤ、シネカメラ、各種記録計の記録紙送り等の駆動用電動機として使用されるが、その構造上および負荷の性質上小型の割に強力なトルクを生ずることと定速性が要求され、各製造業者間においてもこれらの改善と性能の向上に努力が払われている。

筆者らはこのマイクロ・モータの発生トルク量をエネルギー変換の関係を使用して磁気エネルギーより計算する方法を試み、実験結果と比較検討した。更にこの発生トルクの要因となる運転中の空けき磁束の変化について、磁気回路の等価パーミアンスを使用して固定子極と回転子極の占める中心角をパラメータとして磁束分布を計算し、これより空けき磁束の変化と発生トルクの量および分布との関係について考究した。

### 2. マイクロ・モータの磁気回路

マイクロ・モータはその外径が 30 mm 以下、全長が 60 mm 以下の超小型構造のもので、その中に一般の直流電動機と同様に固定子の界磁極部分と回転子の電機子部分すなわち巻線と整流子および貴金属合金線または焼結合金によるブラシを有し、遠心力で接点の開閉する調速機構を内蔵している<sup>1)</sup>。

固定子すなわち界磁石は突極形および円筒形のものがあり、回転子は一般に 3, 5, 7 スロットのものが使用されるが、3 スロットのものは突極形、集中巻となり、5 および 7 スロットのものは円筒形、分布巻となる。

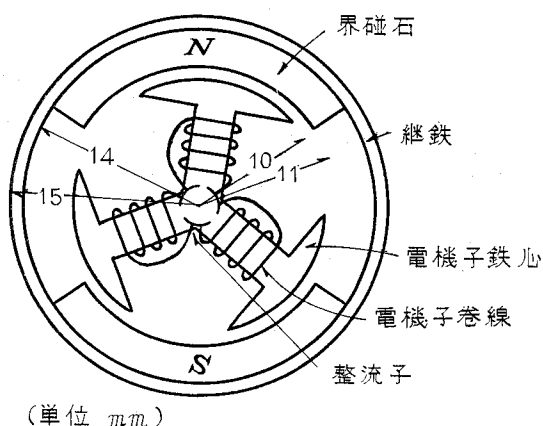


図-1 マイクロ・モータの構造

本研究に使用したマイクロ・モータは固定子、回転子共に突極構造のもので、その主要構造を図-1 に示す。すなわち外径が 30 mm、全長が 55.5 mm のもので厚さ 1 mm の継鉄の内側に内径 22 mm の突極形界磁石があり、その中心角は  $114^\circ$  である。また回転子は直径 20 mm の 3 極のもので空げきにおける極面の中心角は  $74^\circ$  あり、各極には集中巻コイルが巻かれ、その両端は 3 個の整流子片に接続されている。従って磁気回路は界磁石 (N 極)、空げき、電機子鉄心、空げき、界磁石 (S 極)、継鉄を回って一巡し、回転子の回転により空げきのパーミアンスが変化することと、一方の界磁石に回転子の 1 極が対面する時、他方の界磁石には 2 極が対面することにより、界磁石の起磁力による磁束はその構造上空間角  $60^\circ$  を周期として複雑な周期的変動を繰り返す。

### 3. トルク計算法

一般の電気機械は固定子と回転子に巻線が巻かれていて外部より電気または磁気エネルギーの形でパワーが供給され、回転子が回転するときに空げきに貯えられている磁気エネルギーが変化してトルクが発生する。

マイクロ・モータの回転子における電気回路は整流子片によって接続されており、供給電流はこの部分を通じて各巻線に流入するが、これを分割して考えれば図-2 に示すようになる。

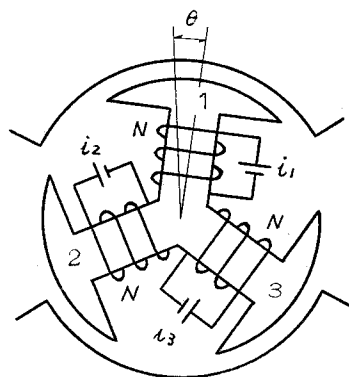


図-2 マイクロ・モータの電気回路

微少時間  $dt$  間の電気エネルギーを  $dW_e$ , 界磁石による磁気エネルギーを  $dW_M$ , 全磁気エネルギーを  $dW_m$ , 角変位量を  $d\theta$ , 発生トルクを  $T$  とすれば, エネルギー変換の関係<sup>2)</sup> から

$$dW_e + dW_M = T d\theta + dW_m \quad (1)$$

となる。ここで各極の巻線の電流を  $i_1, i_2, i_3$ , 自己インダクタンスを  $L_1, L_2, L_3$ , 相互インダクタンスを  $M_{12}, M_{23}, M_{31}$ , 界磁石による磁束を  $\phi_{M_1}, \phi_{M_2}, \phi_{M_3}$ , 巻数を  $N$  とすれば, 磁束鎖交数  $N\phi_1, N\phi_2, N\phi_3$  は

$$\left. \begin{aligned} N\phi_1 &= L_1 i_1 + M_{12} i_2 + M_{13} i_3 + N\phi_{M_1} \\ N\phi_2 &= M_{21} i_1 + L_2 i_2 + M_{23} i_3 + N\phi_{M_2} \\ N\phi_3 &= M_{31} i_1 + M_{32} i_2 + L_3 i_3 + N\phi_{M_3} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

で表わされる。また

$$\begin{aligned} dW_e &= \left( N \frac{d\phi_1}{dt} \right) i_1 dt + \left( N \frac{d\phi_2}{dt} \right) i_2 dt + \left( N \frac{d\phi_3}{dt} \right) i_3 dt \\ &= i_1 d(N\phi_1) + i_2 d(N\phi_2) + i_3 d(N\phi_3) \end{aligned} \quad (3)$$

であるから, 上式に (2) 式の関係を代入すれば

$$\begin{aligned} dW_e &= N(i_1 d\phi_{M_1} + i_2 d\phi_{M_2} + i_3 d\phi_{M_3}) + i_1^2 dL_1 + i_2^2 dL_2 + i_3^2 dL_3 \\ &\quad + 2(i_1 i_2 dM_{12} + i_2 i_3 dM_{23} + i_3 i_1 dM_{31}) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。一方

$$W_m = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + \frac{1}{2} L_3 i_3^2 + M_{12} i_1 i_2 + M_{23} i_2 i_3 + M_{31} i_3 i_1 + W_M$$

であるから

$$dW_m = \frac{1}{2} i_1^2 dL_1 + \frac{1}{2} i_2^2 dL_2 + \frac{1}{2} i_3^2 dL_3 + i_1 i_2 dM_{12} + i_2 i_3 dM_{23} + i_3 i_1 dM_{31} + dW_M \quad (5)$$

従って図-2のごとく界磁石と回転子極との軸のなす角を  $\theta$  とすれば, (4), (5) 式を (1) 式に代入して回転子の有する全発生トルクは次式により求めることができる<sup>3), 6)</sup>。

$$\begin{aligned} T &= N \left( i_1 \frac{d\phi_{M_1}}{d\theta} + i_2 \frac{d\phi_{M_2}}{d\theta} + i_3 \frac{d\phi_{M_3}}{d\theta} \right) + \frac{1}{2} \left( i_1^2 \frac{dL_1}{d\theta} + i_2^2 \frac{dL_2}{d\theta} + i_3^2 \frac{dL_3}{d\theta} \right) \\ &\quad + i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{d\theta} + i_2 i_3 \frac{dM_{23}}{d\theta} + i_3 i_1 \frac{dM_{31}}{d\theta} \end{aligned} \quad (6)$$

前記の供試機について  $N\phi_M, L, M$  を回転角  $5^\circ$  の間隔で実測して  $N d\phi_M/d\theta, dL/d\theta, dM/d\theta$  を求め, これらを用いて  $i$  の大きさおよび方向を考慮して全電流  $I=3A$  までのトルクを計算した。

回転子巻線中の電流の方向はその極の軸が界磁石の軸を境界にして方向が反転し, 軸が一

表-1 実測値と変化率

$\theta$ (°)	$N\Phi_M$ ( $\times 10^{-4}$ Wb)	$Nd\Phi_M/d\theta$ ( $\times 10^{-4}$ Wb/rad)	$L$ ( $10^{-4}$ H)	$dL/d\theta$ ( $\times 10^{-5}$ H/rad)	$M$ ( $\times 10^{-4}$ H)	$dM/d\theta$ ( $\times 10^{-5}$ H/rad)
0	19.1	0	3.362	0	1.213	- 5.50
5	19.1	0.6	3.364	0.58	1.209	- 0.38
10	19.0	2.6	3.371	1.06	1.207	0
15	18.4	4.7	3.384	1.48	1.210	0.26
20	18.2	6.9	3.396	1.84	1.210	0
25	17.5	8.8	3.420	2.28	1.209	- 0.16
30	16.5	10.0	3.444	2.28	1.207	- 0.40
35	15.6	10.8	3.451	2.06	1.203	- 0.46
40	14.6	11.7	3.475	1.91	1.199	- 0.29
45	13.8	13.2	3.491	1.75	1.198	0
50	12.5	14.2	3.505	1.52	1.198	0.19
55	11.1	14.4	3.529	1.26	1.201	0.44
60	9.9	14.9	3.529	1.00	1.205	0.67
65	8.7	16.3	3.534	0.67	1.214	1.11
70	7.0	18.0	3.538	0.42	1.225	1.41
75	5.5	18.4	3.541	0.26	1.238	1.84
80	3.8	20.7	3.545	0.14	1.257	2.14
85	1.9	22.1	3.543	0.04	1.276	2.33
90	0	22.1	3.543	0	1.297	2.33

表-2 トルクの計算値

$\theta$ (°)	$I$ (A)										
	0.03	0.18	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	2.10	2.40	3.00
0	0.46	2.74	4.56	9.13	13.71	18.29	22.88	27.47	32.07	36.68	45.90
5	0.49	2.92	4.86	9.73	14.62	19.51	24.41	29.32	34.24	39.18	49.07
10	0.54	3.24	5.40	10.81	16.22	21.67	27.12	32.59	38.08	43.57	54.61
15	0.56	3.35	5.59	11.20	16.83	22.47	28.14	33.82	39.52	45.24	56.73
20	0.61	3.68	6.13	12.28	18.45	24.64	30.84	37.06	43.30	49.56	62.13
25	0.65	3.91	6.52	13.06	19.57	26.19	32.78	39.39	46.01	52.66	66.00
30	0.66	3.93	6.56	13.13	19.73	26.34	32.96	39.60	46.25	52.93	66.32
35	0.65	3.91	6.52	13.05	19.60	26.16	32.73	39.32	45.92	52.54	65.82
40	0.61	3.68	6.13	12.27	18.42	24.59	30.77	36.96	43.16	49.38	61.85
45	0.56	3.35	5.59	11.19	16.80	22.41	28.05	33.69	39.34	45.01	56.37
50	0.54	3.23	5.39	10.79	16.20	21.61	27.04	32.47	37.91	43.35	54.27
55	0.49	2.92	4.90	9.72	14.59	19.47	24.35	29.23	34.12	39.01	48.81
60	0.46	2.74	4.56	9.12	13.68	18.24	22.80	27.36	31.92	36.48	45.60
平均値	0.56	3.35	5.59	11.11	16.80	22.43	28.07	33.71	39.37	45.04	56.42

表-3 トルクの実測値

$I$ (A)	0.48	0.58	0.63	0.77	0.87	1.03	1.11	1.24	1.36	1.51	1.69	1.90	2.19
$T$ (g-cm)	2.9	4.5	5.8	8.5	10.3	13.1	13.7	17.0	19.1	21.5	24.7	28.4	34.0

致する位置では巻線が短絡される。また電流の大きさについては界磁石の軸を境界にして一方の側に1極、他方の側に2極あることになり、電流比は2:1で1極ある方の巻線および2極ある方の巻線にはそれぞれ全電流の2/3および1/3が流れる。

トルクの計算過程における諸変数を表-1に、計算値を表-2に、実測値を表-3に、またこれらの関係を図-3および図-4に示す。

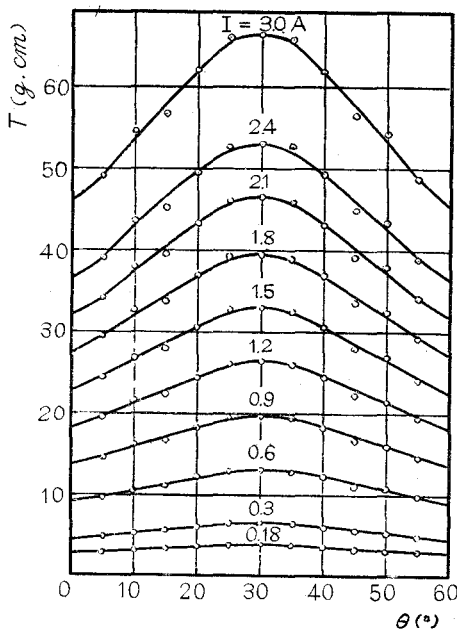
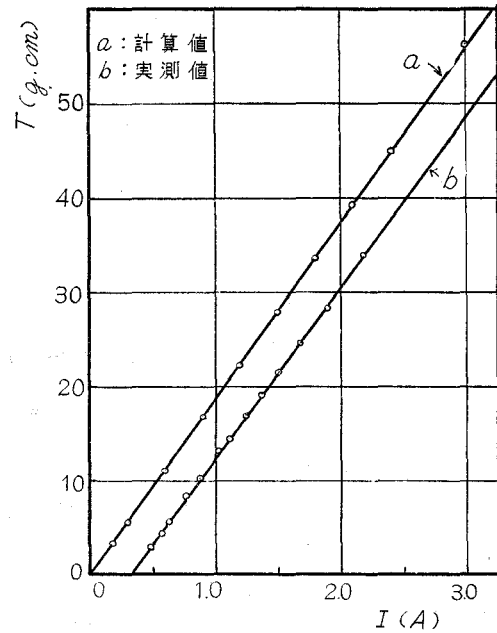


図-3 回転角対トルク特性 (計算値)

図-4 負荷電流対トルク特性  
(計算値, 実測値)

トルクは回転角  $60^\circ$  の間隔で周期的に変動し、最大トルクは周期の中央附近に生じ、変動量は負荷の増加に従って増大する。また巻線の自己インダクタンスおよび相互インダクタンスの変化に基づいて生ずるトルクは、何れも全トルクの1%以下である。更に周期中の変動トルクの平均値を運転時の平均トルクとして実測値と比較すると、図-4に示すように共に負荷電流に対して直線的になり、両者の縦軸上の差は回転中の銅損、鉄損、漂遊負荷損、機械損等による損失トルクを表わす<sup>4)</sup>。

以上の結果から、巻線の自己インダクタンスおよび相互インダクタンスの変化に基づいて生ずるトルクの成分を閑却すれば、トルクは近似的に次のようにして求められる。すなわち負

荷電流を  $I$  (A), 損失トルクを  $T_0$  (g-cm), 全有効トルクを  $T$  (g-cm) とすれば

$$T = KNI - T_0$$

ここで  $K$  は比例定数を表わし,  $\theta = 0$  および  $\theta = \pi/3$  における磁束を  $\Phi_0$  (Wb) および  $\Phi_{\pi/3}$  (Wb) とすれば (6) 式より

$$T \doteq \frac{1}{9.8} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot N \left( \frac{I}{3} \int_0^{\pi/3} \frac{d\Phi}{d\theta} d\theta + \frac{I}{3} \int_{\pi/3}^{\pi} \frac{d\Phi}{d\theta} d\theta + \frac{2I}{3} \int_{\pi/3}^{5\pi/3} \frac{d\Phi}{d\theta} d\theta \right) \times 10^5 - T_0$$

となり

$$T \doteq \frac{1}{4.9\pi} N \left( \Phi_0 + \Phi_{\pi/3} \right) I \times 10^5 - T_0 \quad (7)$$

として求めることができる。

従って以上の関係を検討すると, 回転子の有効トルクは回転中の空げきの磁束の大きさと分布の状態によって決定することが判明した。磁束量の最大値は  $\Phi_0$  で界磁石の起磁力とその位置における磁気回路のパーミアンスによって決定するものであり, 回転子各極のトルクの変化は空げきの磁束分布の変化の状態従って固定子極と回転子極の空間的な位置変化の状態によって決定するものである。

#### 4. 磁気回路の解析における仮定

マイクロ・モータのトルク量を決定する要因となる空げきの磁束分布の状態を解明するに当り, 磁気回路を解析することになるが, 突極形回転子においては円筒形回転子のように空間的に静的磁束分布をしないため計算が複雑になる。また界磁石による起磁力  $AT$  の大部分は空げき部に集中しているものと考えられるので, 磁気回路の等価パーミアンス, 磁束量の近似計算をする上に次のような仮定を設けた。

- (1) 巻線と鎖交する磁束は空げきに面する極面より出入する磁束のみとし, 巻線の途中より出入する漏れ磁束は無視する。
- (2) 鉄心部と空げき部の透磁率  $\mu$  の比は  $10^3 \sim 10^4$  程度であるから計算上鉄心部の透磁率は無限大とする。
- (3) 磁路は仮定磁路法によるものとする。すなわち同心円筒の平行曲面間の磁束は放射状になるものとし, 端部より出入する磁束は円弧状になるものとし, また分流する磁束は磁路の等価パーミアンスに比例するものとする。

5. 空けきの等価パーミアンス<sup>8)</sup>

## (1) 磁極面一回転子極面間

図-5 において 回転子極面半径  $r_1$  (m), 回転子極面長さ  $L$  (m), 磁極面半径  $r_2$  (m), 磁極面と回転子極面との重なり角  $\theta$  (rad), 空気の透磁率  $\mu$  (Wb/AT・m), 等価リクタンス  $R$  (AT/Wb), 等価パーミアンス  $P_a$  (Wb/AT) とすれば, 長さ  $dr$  の微少部分の等価リクタンス  $dR$  は

$$dR = \frac{dr}{\mu L \theta r} = \frac{1}{\mu L \theta} \frac{dr}{r}$$

となり

$$R = \frac{1}{\mu L \theta} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{2.3}{\mu L \theta} \log_{10} \frac{r_2}{r_1}$$

従って

$$P_a = \frac{1}{R} = \frac{\mu L \theta}{2.3} \frac{1}{\log_{10} r_2 / r_1}$$

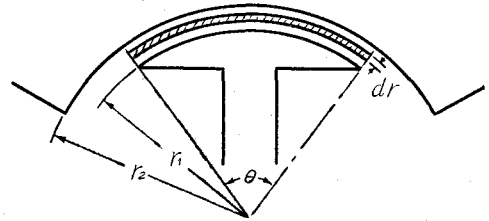


図-5 磁極面一回転子極面間の等価パーミアンス

ここで  $\mu = 1.257 \times 10^{-6}$  (Wb/AT・m),  $L = 9 \times 10^{-3}$  (m),  $r_1 = 10 \times 10^{-3}$  (m),  $r_2 = 11 \times 10^{-3}$  (m) と置けば

$$P_a = 1.188 \theta \times 10^{-7} \quad (8)$$

## (2) 磁極面一回転子極面端部間

図-6 において 空けき長  $\delta$  (m), 平均磁路長  $l$  (m), 平均断面積  $S$  (m<sup>2</sup>), 等価パーミアンス  $P_b$  (Wb/AT) とし, 平均磁路長を磁路の中央にとると

$$l \doteq 1.22 \delta$$

従って

$$S = \frac{\pi \delta^2 L}{4} = \frac{\pi}{4 \times 1.22} \delta L$$

となり

$$P_b = \frac{\mu S}{l} = 0.528 \mu L$$

ここで (1) の  $\mu$ ,  $L$  を用いて

$$P_b = 0.060 \times 10^{-7} \quad (9)$$

## (3) 磁極面端部一回転子極面端部間

図-7 において 磁極面端部と回転子極面端部間の差を  $s$  (m), 等価パーミアンス  $P_c$  (Wb/



AT) とすれば

$$l \doteq 1.22s$$

$$S = \frac{\pi}{4} \frac{s^2 r_2 \theta}{l} = \frac{\pi}{4 \times 1.22} s r_2 \theta$$

従って

$$P_c = \frac{\mu S}{l} = 0.528 \mu r_2 \theta$$

ここで (1) の  $\mu$ ,  $r_2$  を用いて

$$P_c = 0.073 \theta \times 10^{-7} \quad (10)$$

#### (4) 磁極端面一回転子極面間

図-8 において磁路の最大半径  $r$  (m), 等価パーミアンス  $P_a$  (Wb/AT) とすれば, 幅  $dr$  の微少部分の等価パーミアンス  $dP_a$  は

$$dP_a = \mu \frac{L dr}{\frac{\pi}{2} r} = \frac{2\mu L}{\pi} \frac{dr}{r}$$

従って

$$P_a = \frac{2\mu L}{\pi} \int_{\delta}^r \frac{dr}{r} = \frac{2.3 \times 2 \mu L}{\pi} \log_{10} \frac{r}{\delta}$$

ここで (1) の  $\mu$ ,  $L$  および  $\delta = 10^{-3}$  (m) を用いて

$$P_a = \left( 0.166 \log_{10} \frac{r}{10^{-3}} \right) \times 10^{-7} \quad (11)$$

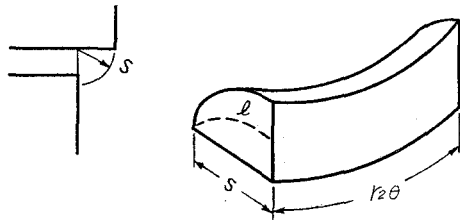


図-7 磁極面端部一回転子極面端部間の等価パーミアンス

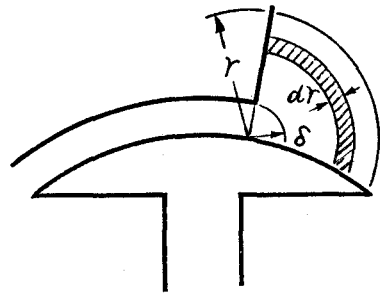


図-8 磁極端面一回転子極面間の等価パーミアンス

表-4 1 極当りの等価パーミアンス

(単位  $\times 10^{-7}$  Wb/AT)

$\alpha$ (°)	114°:74°	114°:50°	114°:30°	90°:90°	50°:100°	$\alpha$ (°)	114°:74°	114°:50°	114°:30°	90°:90°	50°:100°
0	1.843	1.284	0.820	2.095	1.484	50	1.244	0.949	0.656	1.151	0.802
5	1.843	1.284	0.820	2.100	1.474	55	1.129	0.849	0.575	1.035	0.686
10	1.843	1.284	0.820	2.022	1.453	60	1.010	0.732	0.478	0.920	0.569
15	1.843	1.284	0.820	1.935	1.424	65	0.895	0.616	0.383	0.802	0.454
20	1.783	1.284	0.820	1.840	1.384	70	0.780	0.499	0.267	0.686	0.336
25	1.726	1.284	0.820	1.733	1.324	75	0.662	0.383	0	0.574	0.220
30	1.651	1.224	0.820	1.617	1.268	80	0.546	0.267	0	0.454	0
35	1.563	1.154	0.820	1.500	1.151	85	0.429	0	0	0.336	0
40	1.467	1.122	0.820	1.384	1.035	90	0.313	0	0	0.220	0
45	1.360	1.040	0.749	1.268	0.920						

実際に回転子各極と界磁石間の空けきの等価パーミアンスは回転子の位置による両者の重なり角  $\theta$  によって決定するものであり、その位置における各部の等価パーミアンス  $P_a$ ,  $P_b$ ,  $P_c$ ,  $P_d$  の並列回路のパーミアンスとして求められる。

供試機の固定子極と回転子極の占める中心角は  $114^\circ:74^\circ$  であり、この他に  $114^\circ:50^\circ$ ,  $114^\circ:30^\circ$ ,  $90^\circ:90^\circ$ ,  $50^\circ:100^\circ$  のように中心角の種々異なる場合について、(8)~(11) 式の関係を用いて回転角  $\alpha=0\sim90^\circ$  における 1 極当りの等価パーミアンスを計算したものを表-4 に示す。

## 6. 空けき磁束の等価計算法

固定子と回転子の相対的な位置関係は次の 4 つの場合に分類され、それぞれの合成等価パーミアンスより 1 極面を通過する磁束量が計算される。

### (1) 1 極のみ対向する場合

図-9 のように 1 極が一方の界磁極に対向し、他の 2 極が他方の界磁極に対向する場合、回転子極 1, 2, 3 の等価パーミアンスを  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  とし、合成等価パーミアンスを  $P$ , 回転子極 1 の磁束を  $\phi_1$  とすれば

$$P = 1 / \left( \frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2 + P_3} \right) = \frac{P_1(P_2 + P_3)}{P_1 + P_2 + P_3}$$

磁束は起磁力一定の場合磁気回路のパーミアンスに比例するから、比例定数を  $k$  として

$$\begin{aligned} \phi_1 &= kP \\ &= k \frac{P_1(P_2 + P_3)}{P_1 + P_2 + P_3} \end{aligned} \quad (12)$$

### (2) 他極と並列磁路をなす場合

図-10 のように 1 極が他極と共に一方の界磁極に対向し、他の 1 極が他方の界磁極に対向

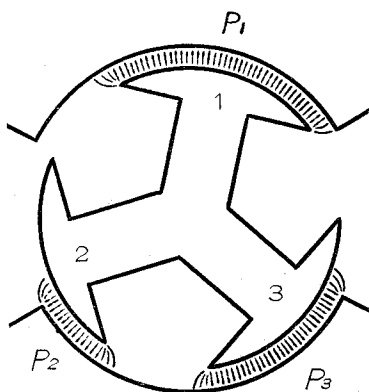


図-9 1 極のみ対向する場合

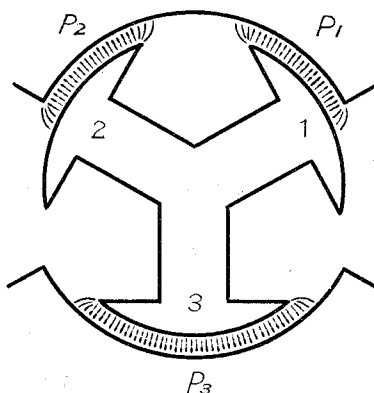


図-10 他極と並列磁路をなす場合

する場合、各部の記号および諸量の記号は(1)の場合と同様とすれば

$$P = 1 / \left( \frac{1}{P_1 + P_2} + \frac{1}{P_3} \right) = \frac{P_3(P_1 + P_2)}{P_1 + P_2 + P_3}$$

分流磁束はリラクタンスに逆比例するから

$$\phi_1 = kP \frac{1}{P_2} / \left( \frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2} \right) = k \frac{P_1 P_3}{P_1 + P_2 + P_3} \quad (13)$$

### (3) 1極が両界磁極に対向する場合

図-11のように1極が両界磁極に対向し、2極がそれぞれ一方の界磁極に対向する場合、回転子極1の両界磁極に対向する部分の等価パーミアンスを  $P_1$ ,  $P_1'$  とすれば

$$\begin{aligned} \phi_1 &= k \left\{ 1 / \left( \frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_1' + P_3} \right) \right\} \left\{ \frac{1}{P_1'} / \left( \frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_3} \right) \right\} \\ &\quad - k \left\{ 1 / \left( \frac{1}{P_3} + \frac{1}{P_1' + P_3} \right) \right\} \left\{ \frac{1}{P_3} / \left( \frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_3} \right) \right\} \\ &= k \left( \frac{P_1 P_3}{P_1 + P_1' + P_3} - \frac{P_1' P_2}{P_1' + P_2 + P_3} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

### (4) 他極が両界磁極に対向する場合

図-12のように他の1極が両界磁極に対向し、2極がそれぞれ一方の界磁極に対向する場合、回転子極2の両界磁極に対向する部分の等価パーミアンスを  $P_2$ ,  $P_2'$  とすれば

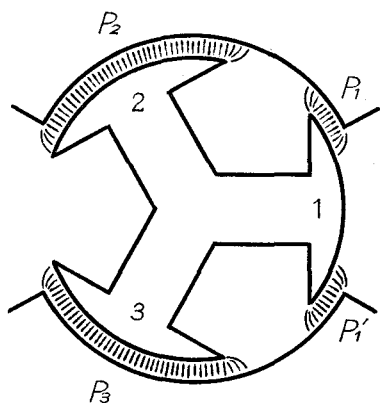


図-11 1極が両界磁極に対向する場合

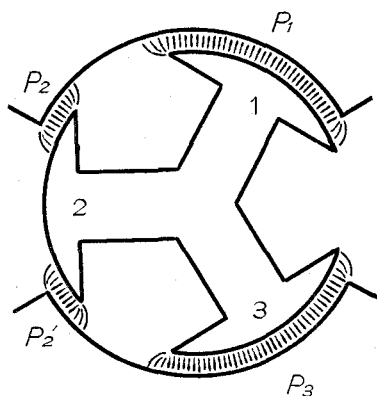


図-12 他極が両界磁極に対向する場合

$$P = 1 / \left( \frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2' + P_3} \right) = \frac{P_1(P_2' + P_3)}{P_1 + P_2' + P_3} \quad \phi_1 = k \frac{P_1(P_2' + P_3)}{P_1 + P_2' + P_3} \quad (15)$$

固定子極と回転子極の占める中心角が前記の5つの異なる場合について、1極当りの等価パーミアンスを基にして(12)~(15)式の関係を用いて回転子の各位置における合成等価パーミアンスを求め、これより1極が回転角  $\alpha = 0 \sim 90^\circ$  まで回転する時のその極を通過する比磁束

量 (比例定数  $k=1$  と置いたもの) を計算したものを表-5 に示す。

表-5 1 極当りの比磁束量

(単位  $\times 10^{-7}$  Wb/AT)

$\alpha$ (°)	114°:74°	114°:50°	114°:30°	90°:90°	50°:100°	$\alpha$ (°)	114°:74°	114°:50°	114°:30°	90°:90°	50°:100°
0	0.964	0.684	0.441	0.980	0.644	50	0.593	0.446	0.309	0.603	0.450
5	0.967	0.684	0.442	0.980	0.643	55	0.538	0.397	0.265	0.552	0.387
10	0.967	0.680	0.434	0.963	0.635	60	0.482	0.342	0.221	0.490	0.322
15	0.964	0.675	0.391	0.944	0.625	65	0.427	0.288	0.177	0.428	0.256
20	0.946	0.665	0.410	0.919	0.592	70	0.372	0.234	0.126	0.359	0.188
25	0.925	0.608	0.410	0.892	0.616	75	0.316	0.182	0	0.294	0.122
30	0.897	0.612	0.410	0.860	0.626	80	0.256	0.128	0	0.227	0
35	0.726	0.608	0.410	0.728	0.616	85	0.199	0	0	0.163	0
40	0.689	0.539	0.410	0.692	0.592	90	0.084	0	0	0.070	0
45	0.649	0.493	0.391	0.650	0.511						

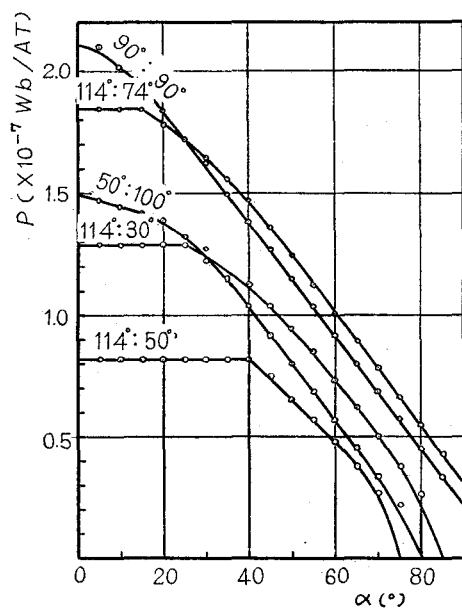


図-13 空げきのパーミアンス

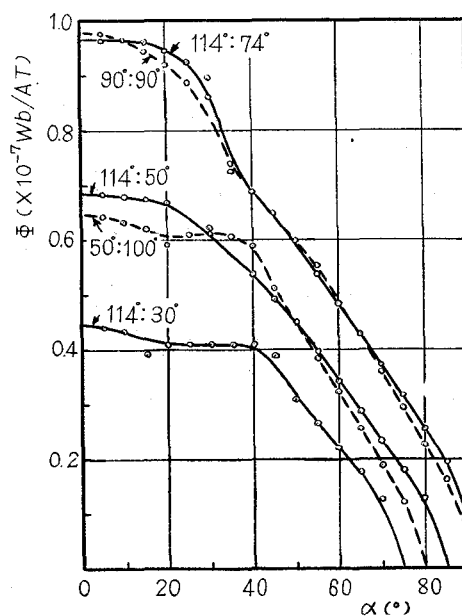


図-14 比磁束量

## 7. 磁束分布の比較検討

磁束分布の状態は、回転子の各位置における空げきのパーミアンスの変化から比磁束量の変化を求めることによって解明され、磁束量の大小は各場合の比磁束量を比較することによって得られる。前記5つの場合における空げきのパーミアンスと比磁束量の変化を図-13および

図-14 に示す。

これら空けきのパーミアンスの変化および比磁束量の変化を比較検討すれば、次のようなことが考察される。

- (1) 界磁極と回転子極の重なり角の大なる程有効磁束は大となる。
- (2) 回転子極の中心角の小なる程パーミアンスの平たん部が長くなり、磁束量は減少してその平たん部も長くなる。
- (3) 回転子極の中心角を大にすれば回転子極 2 極が同時に界磁極 1 極に対向する部分が増し、有効磁束が減ずる。また鉄心材料の量が増加する。従って界磁極の中心角を小にすれば磁石材料の量は減少するが重なり角も小となり、有効磁束を減ずる。
- (4) 界磁極の中心角を大にすれば (3) と同様の理由で回転子極の中心角が小となり、有効磁束を減ずる。
- (5) 界磁極と回転子極の中心角の和は  $180^\circ$  以下でこれに近い値が良く、また両者の中心角の差の小なる程有効磁束は大となる。

#### 8. トルク分布の比較検討

回転子が 3 極の場合に、回転方向と反対方向に極①, ②, ③とすれば、図-15 の磁束  $\Phi$  および磁束の変化率  $d\Phi/d\theta$  を示す曲線において、極①が  $0 \sim \pi/3$  まで回転するとき極②, ③はそれぞれ  $4\pi/3 \sim 5\pi/3$ ,  $2\pi/3 \sim \pi$  まで回転し、この期間中の各極の発生トルクの積分値はそれぞれ図の斜線を施した部分の面積に比例した値になり、それらの和を平均すれば運転時の回転子の有する平均トルクが得られる。トルクの変動周期は  $\pi/3$  で、他の周期には固定子に対する 3 極の相対位置が変化するのみでトルク量は同一の値となる。従って得られた  $\Phi$  の値から  $d\Phi/d\theta$

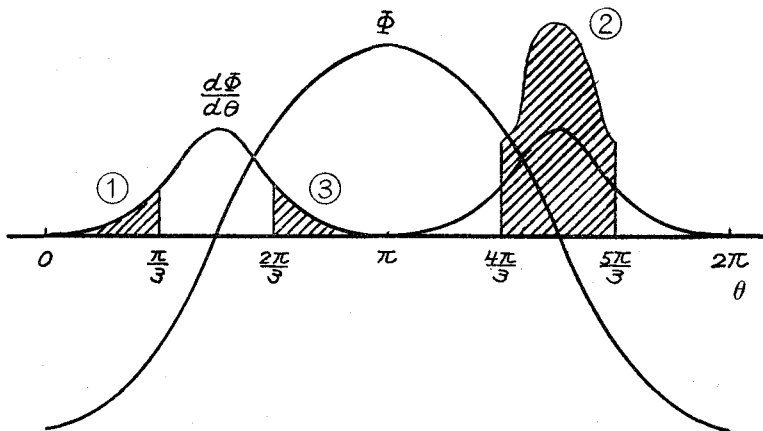


図-15 磁束および磁束の変化率

$d\theta$  の曲線を求めることにより、その形状からトルク分布の状態が解明できる。

前記の5つの場合における  $d\Phi/d\theta$  の曲線を図-16 に示す。

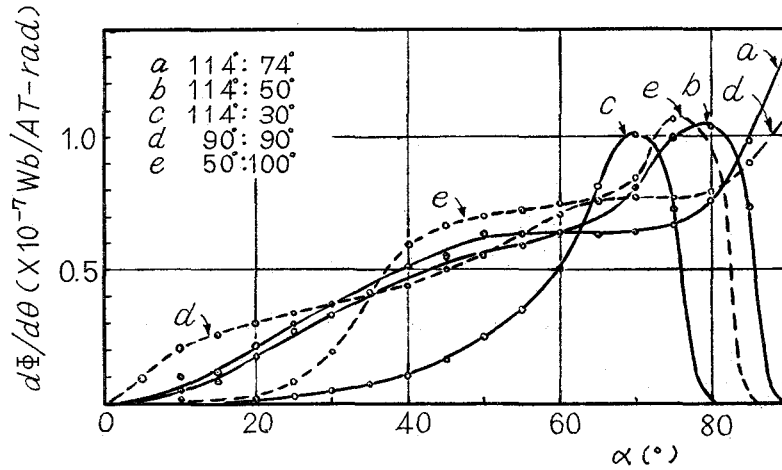


図-16 比磁束量の変化率

この比磁束量の変化率を比較検討すれば、次のようなことが考察される。

- (1) 回転子極の中心角を小にする程比磁束量の変化率の最大値は減少し、 $\pi/2$  より小なる方向に移行する。
- (2) これと同時に変化率は総体的に減少し、曲線の形状はせん鋭化の傾向を生ずる。
- (3) その結果界磁極の磁軸を境にして回転子の1極ある方の極のトルク量は相対的に増加するのに対して2極ある方の極のトルク量は減少し、いわゆるトルク分布は1極に集中する傾向を生ずる。

## 9. 結 言

マイクロ・モータのトルクの計算式を磁気エネルギーの関係より導出し、これが空げきの磁束分布の変化と重要な関連を有することからその磁気回路を理論的に解析し、固定子極および回転子極の占める中心角の種々異なる場合について空げきの等価パーミアンスおよび磁束分布を計算し、これより両者の中心角をパラメータとする発生トルクの量および分布に関する相対的傾向を得た。これを要約すれば次の通りである。

- (1) トルクをより強力にするためには磁石の起磁力を大にして磁束量を増大することであるが、構造上の寸法と磁石材料とにより限度がある。
- (2) 固定子極あるいは回転子極の占める中心角を大にすればトルク分布曲線は緩やかとなり、各極のトルクの分散化が得られ総量を増すが、一方回転子極2極が同時に固定子極1極に

対向する部分が多くなり、分流通束が増加して合成トルクの増加は見られなくなる。

(3) 固定子極あるいは回転子極の占める中心角を小にすれば界磁石あるいは鉄心材料の量は減少してモータ自体の軽量化の目的には沿うが、両者の対向部分は減少してトルク分布曲線はせん鋭となりトルクは1極に集中化して総量を減ずる。

(4) 固定子極および回転子極の占める中心角の和は  $180^\circ$  以下でこれに近い値が良く、また両者の差の小なる程磁束量は増大し、トルクも大となる。 (昭和40年4月30日受理)

#### 文 献

- 1) 大島修三・大岡宏・大西和夫：日立評論, 46, 1135 (1964).
- 2) 宮入庄太：エネルギー変換工学入門 上, 26, 丸善 (1963).
- 3) 図所忠則・伊達隆三・近藤修：昭和39年度電気四学会北海道支部連合大会講演論文集, 13.
- 4) 図所忠則・伊達隆三・近藤修：昭和39年度電気四学会北海道支部連合大会講演論文集, 12.
- 5) 茂木晃：磁気回路, 21, 共立出版 (1962).
- 6) A. E. Fitzgerald, C. Kingsley: Electric Machinery, 57, McGraw-Hill (1961).